

基于 OH-PLIF 技术的环形燃烧室 预混火焰结构实验

王中华, 唐 强, 张 力, 杨仲卿, 张腾飞
(重庆大学 能源与动力工程学院
低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘 要: 针对微型燃气轮机环形燃烧室中的燃烧特性,利用平面激光诱导荧光(PLIF)技术,对环形燃烧室内甲烷/空气预混湍流多束火焰燃烧开展实验研究,得到 OH 自由基物质的量浓度分布,并研究雷诺数和当量比对火焰结构特征参数的影响。结果表明:OH 自由基浓度分布呈现环形结构,并有火焰托举和分叉现象,OH-PLIF 瞬时和平均图像揭示了火焰具有湍流和层流预混结构共同特征。火焰结构特征参数的定量分析表明,雷诺数升高,拉伸火焰预混锥形结构,促进射流之间相互作用;康达效应使内焰向内壁面弯曲,火焰张角增大;适当调节预混火焰的当量比,有利于火焰结构的稳定。

关 键 词: 微型燃气轮机; 环形燃烧室; OH 平面激光诱导荧光(OH-PLIF); 预混湍流燃烧; 火焰结构

中图分类号: V231.2 **文献标志码:** A

Experiment on structure of premixed flame in annular combustor using OH-PLIF

WANG Zhonghua, TANG Qiang, ZHANG Li,
YANG Zhongqing, ZHANG Tengfei

(Key Laboratory of Low-grade Energy Utilization Technologies and Systems,
Ministry of Education, School of Energy and Power Engineering,
Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In view of the combustion characteristics of a micro gas turbine annular combustor, a planar laser induced fluorescence (PLIF) technique was used to investigate the effects of Reynolds number and equivalent ratio on the structural parameters of a methane/air premixed turbulent flame in the annular combustor. Results showed that the OH radical concentration distribution exhibited a ring structure with flame lift and bifurcation phenomena. The instantaneous and average images of OH-PLIF revealed that the flame had the common characteristics of turbulent flow and laminar premixed structure. The quantitative analysis of the characteristic parameters of flame structure showed that when the Reynolds number increased, the flame premixed conical structure was stretched and the interaction between jets was promoted. The conda effect made the inner flame bend towards the inner wall and the flame angle increase. Proper adjustment of the equivalent ratio of premixed flame is

收稿日期:2019-02-22
基金项目:页岩气清洁燃烧关键技术及微型燃气轮机分布式能源系统(cstc2015shmszx90010)
作者简介:王中华(1993—),男,硕士生,主要从事微型燃气轮机和清洁燃烧研究。

引用格式:王中华,唐强,张力,等. 基于 OH-PLIF 技术的环形燃烧室预混火焰结构实验[J]. 航空动力学报,2019,34(9):2010-2017. WANG Zhonghua, TANG Qiang, ZHANG Li, et al. Experiment on structure of premixed flame in annular combustor using OH-PLIF[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(9): 2010-2017.

beneficial to the stability of flame structure.

Key words: micro gas turbine; annular combustion chamber;
OH planar laser induced fluorescence(OH-PLIF); premixed turbulent flame;
flame structure

微型燃气轮机具有燃料适应性高、排放低、功率密度大及维护成本低的特点^[1-4]。燃烧室作为关键部位,内部流场的变化和燃烧情况直接影响燃烧稳定性、能源利用效率和污染物排放。火焰反应区是微型燃气轮机燃烧机理研究和工业应用的关键,开展火焰反应区结构的研究,能够为微型燃气轮机的燃烧室优化设计提供指导^[5-8]。

平面激光诱导荧光(planar laser induced fluorescence, PLIF)燃烧诊断技术通过测量 OH 自由基的浓度来表现流场中火焰的反应区域^[9-11]。因具有灵敏度高,响应时间短和流场干扰性小等特点,已被广泛应用到燃烧诊断实践。

刘玉英、Pu 等^[12-13]利用 OH-PLIF 技术研究了甲烷合成气在本生灯上的预混燃烧特性,并以 OH 基反应区厚度表征火焰厚度。Liao 等^[14]基于 PLIF 技术研究了单束射流火焰近喷嘴处的火焰反应区结构。Jin 等^[15-16]通过研究合成气预混火焰燃烧速度、结构与燃料组分的关系,发现优先扩散和流场拉伸共同作用于火焰结构的变化。杨丽等^[17]在本生灯燃烧器上研究了生物质/煤化合成气的燃烧特性。实验结果表明,湍流强度、当量比和氢气含量对合成气火焰中 OH 自由基的强度,反应层厚度、火焰高度、火焰锋面分布以及火焰传播速度均有影响。多数研究已经对单束火焰结构、燃料组分及其他影响因素进行了详细的分析,但对于多火焰相互作用的复杂燃烧室实验少有涉及。

目前,针对环形结构燃烧室中多束火焰相互作用的燃烧特性研究以数值模拟居多。张文普等^[18]基于燃气轮机环型燃烧室的真实结构进行了数值模拟。环形燃烧室预混喷嘴的特殊设计易满足点火条件。石黎等^[19]也采用数值模拟对环形燃烧室内 OH 自由基分布和 NO_x 的生成规律进行了研究,结果表明燃烧室中无强烈的火焰脉动及熄火现象。应用 PLIF 技术能实时展现环形结构中多束火焰相互作用的燃烧状态。其次,多数研究只是定性的得到火焰结构与影响因素的关系,鲜有通过定义火焰特征参数而定量得到湍流状态下火焰实际结构变化。

本文针对环形燃烧室,利用 PLIF 技术测量甲烷/空气的贫燃预混湍流火焰的 OH 自由基分布,得到了环形燃烧室中多束火焰共同燃烧的瞬时和平均特征图像;定量分析当量比、雷诺数及康达效应等对火焰结构具体变化的影响规律。研究有助于更好地组织燃烧过程,为优化环形燃烧室结构和实现高效超低排放燃烧提供支撑。

1 实验系统及测量方法

1.1 实验系统

实验系统由 OH-PLIF 激光诊断系统、供气系统和燃烧器三部分组成,实验系统如图 1 所示。供气系统由高压气瓶、转子流量计、气体混合腔和单向阀组成。各组分气体在混合腔内充分预混后进入燃烧器喷管。实验过程中火焰燃料工况的当量比 φ 为 0.4~0.9,雷诺数 Re 在 800~2000 范围内,其中雷诺数计算的特征尺寸为预混喷口内径 $d=6\text{ mm}$ 。

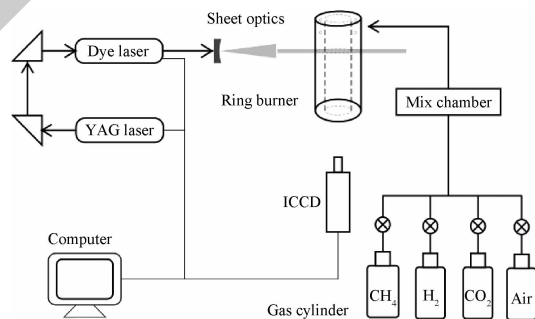


图 1 PLIF 实验系统图

Fig. 1 PLIF experimental system diagram

1.2 环形燃烧室结构

实验使用环形燃烧室参照 Capstone C65 微型燃气轮机的燃烧室结构,其特点为四个预混喷嘴沿圆周均匀布置,侧向安装,使燃料由喷口进入环形腔内着火燃烧,点火条件易满足且温度梯度较小。通过模化原则来确定尺寸,采用透光率较好的石英材料制成并进行脱羟基处理,实物模型如图 2 所示。

燃烧室环形腔体外径 $\Phi_i=80\text{ mm}$,内径 $\Phi_n=40\text{ mm}$,环形宽度 20mm,整体高度为 180mm。四

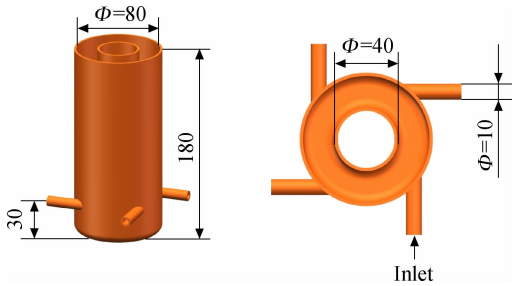


图 2 环形燃烧器模型图(单位:mm)
Fig. 2 Model diagram of annular burner (unit:mm)

个喷口处于同一平面,距离环形腔底部 30 mm。喷口内径 $d=6$ mm,壁厚 $\delta=2$ mm。

1.3 测量方法

OH-PLIF 系统由 Nd:YAG 泵浦激光器(Quanta-Ray,spectra)产生 355 nm 的脉冲光源,经染料激光器(Cobra Strech Series,Sirah laser-technik,GmbH)后波长变为 567.110 nm,再经 2 倍频晶体倍频后,最终波长变为 283.55 nm,并且能量维持在 8 mJ 以上,经过透镜组后形成片光用以激发 OH 基产生荧光信号。

荧光信号由 ICCD(intensified charge-coupled device)相机接收,相机在镜头前装有 OH 滤波片(LAVISION,VZ14-0353)和紫外线透镜(UV-60 mm,F3.5 s)过滤干扰信号,并且设置拍摄门宽为 100 ns,以最大减少环境光的影响。每个工况连续记录 200 幅瞬态 OH-PLIF 照片,拍摄频率为 200 Hz,周期为 1 s,并进行背景及噪点的消除。记录的图像使用系统软件 Davis8 进行处理。

2 实验结果与分析

2.1 预混湍流火焰形状

甲烷流量保持不变,空气流量增加,环形燃烧室预混火焰的 CCD(charge-coupled device)图像如图 3 所示。在空气流量较小的情况下,火焰在喷口附近形成稳定的锥形态的蓝色预混火焰,可

以清晰地分辨出内外焰的轮廓且四个喷口处火焰互不干扰。随着空气流量的增大,火焰开始变长并出现波动,四股气流开始相互影响,火焰由稳定的锥形变成环形状态,但仍处于不稳定的波动。当喷口速度达到 3~4 m/s 后,四个喷口处火焰相互点火使得环形结构趋于稳定,火焰分布较均匀。随着空气流量继续增大,流场的扰动持续增强,火焰整体颜色变暗。

2.2 火焰 OH-PLIF 瞬时与平均图像

图 4 为甲烷预混湍流火焰的 OH-PLIF 瞬时图像。其拍摄平面为四个喷口所在横截面。OH 代表的火焰锋面随着时间的变化呈现出褶皱和卷曲的状态,主要出现在燃料射流的上下游之间。随着雷诺数的增大,火焰锋面也变得更加不稳定,整个环形燃烧室中 OH 荧光信号增强,燃烧更加剧烈。火焰锋面结构与湍流强度有密切联系,湍流涡扰动到了火焰的反应区域外层,但没有扰动到内层的预热区。湍流尺度与层流火焰厚度大致相当,所以火焰保留了一定的层流火焰结构,处于火焰片模型区域。OH 自由基主要集中在预混火焰前锋面处,由于燃烧室的环形结构和气流扰动的影响,在预混燃烧区所形成的 OH 自由基逐渐向外扩散。在高温作用下,OH 自由基缓慢消耗并逐渐形成火焰外锋面。当量比降低,火焰锋面随着时间变化产生连续性脉动,暗示了湍流锋面局部熄火与重新点火的不稳定性。

三组工况下,环形燃烧室 OH 基的分布区域相同,都在四个喷口外所形成了中心对称预混湍流火焰结构,且出现了火焰分叉现象。与图 3 中形成环形火焰的 CCD 图像比较,观察到 OH-PLIF 瞬时图像中预混火焰并不是在喷口处形成,而是被托举出来,在喷口之外一段距离出现并开始波动。实验结果表明,Re 较大时,预混气流无法在喷口处稳定着火,上游火焰的顶部接触到下游火焰的根部时,下游火焰的燃烧产物通过扩散

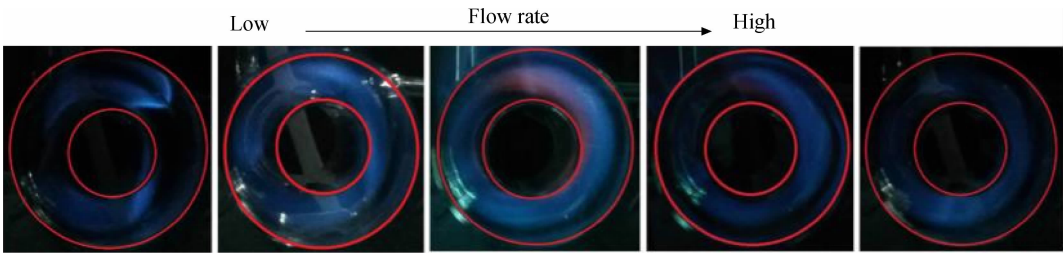


图 3 环形燃烧室甲烷预混火焰 CCD 图像
Fig. 3 CCD image of methane premixed flame in annular combustor

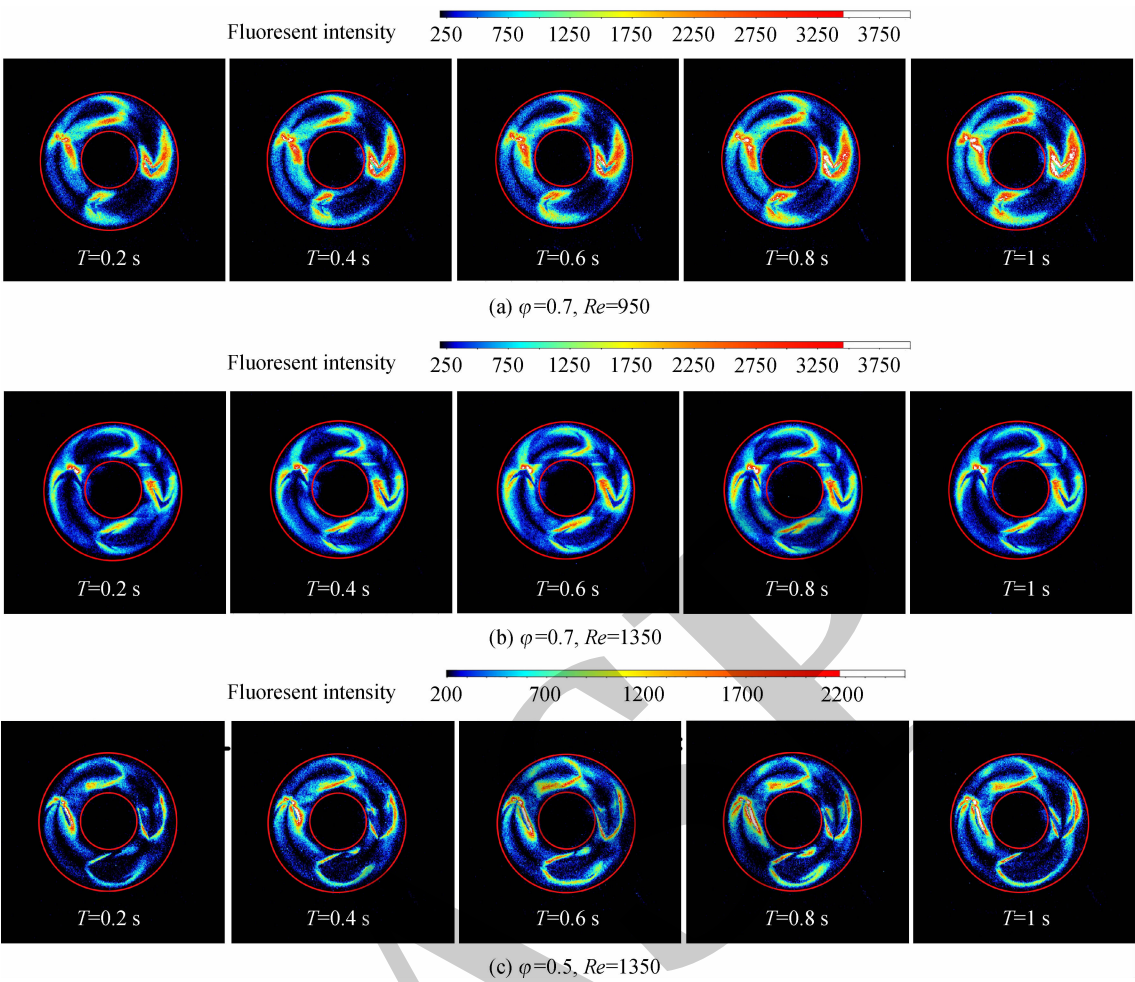


图 4 环形燃烧室甲烷预混火焰 OH-PLIF 瞬时图像

Fig. 4 Instantaneous image of methane premixed flame OH-PLIF in annular combustor

作用以及燃烧的不稳定性改变了下游喷口处预混气流的运动,破坏了其原本能够满足锥形火焰的温度和速度条件。由于缺乏固定的点火源也促进了预混气向外部扩散在环形空间燃烧,火焰就被托举出来。

与图 4 相同实验条件下,由 200 张瞬时图像叠加得到的甲烷预混湍流火焰 OH-PLIF 平均图像如图 5 所示。因为处于湍流状态,所以瞬时湍流火焰锋面呈现毛刷褶皱状并具有一定的随机性。多张瞬时图像叠加并平均化处理,就可得到

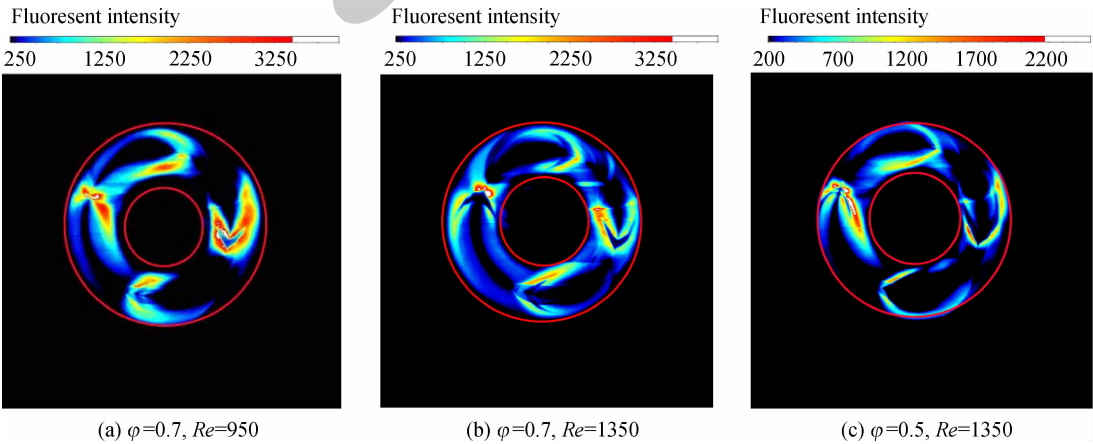


图 5 环形燃烧室甲烷预混火焰 OH-PLIF 平均图像

Fig. 5 Average image of methane premixed flame OH-PLIF in annular combustor

火焰锋面褶皱区域的范围,且通过大量数据与图像分析,褶皱区域在本实验内荧光强度范围为 200~500。

由图 5(a)图像可知,燃烧室 OH 基分布形成了不完全连续的环形结构,其左上部分两个喷嘴的 OH 基分布区域相互连接,而右下角两个喷口保持了预混锥形火焰结构。图 5(b)结果表明,雷诺数增大,火焰整体结构由粗短型拉伸成长条状,OH 基高浓度区域向下游移动,燃烧室 OH 基分布形成了连续的环形结构。湍流强度随之增大,整个流场的相互扰动明显加强,预混锋面处已经发生燃烧反应的气体在扩散作用下逐步向外形成燃烧区。最终使得 OH 基分布于整个燃烧室,形成环形火焰。

图 5(c)的结果表明,雷诺数相同,当量比小时,燃烧室中 OH 基保持环形火焰结构,喷口处预混锥形火焰结构被拉伸,OH 基分布区域及荧光强度减少,火焰锋面的褶皱程度相对减小。尽管各个喷口的火焰一直延伸至下游,但是甲烷浓度较低,火焰锋面的不连续导致局部熄火等现象。甲烷浓度扩散和流场的作用使火焰长度变长,但燃烧反应区域有效面积整体缩小。

2.3 环形燃烧室火焰结构特征参数

如图 6 所示,将喷口处的分叉火焰分为内焰和外焰,定义火焰结构特征参数,用来表征湍流与

火焰相互作用的规律。其中 L_i 和 L_o 分别为内、外焰的弦长,表示火焰在圆周上的延伸程度; b 为火焰的最大厚度,反映了单束火焰在径向上的扩张距离;弯度 f 为火焰中弧线到其弦线最大的距离;无量纲化相对弯度 F 为 f 与其火焰弦长 L 的百分比值,反映了火焰在流场中拉伸和变形程度; θ 为内外焰弦线之间的张角,用于表示火焰分叉现象的结构差异。

图 7 是火焰结构特征参数随雷诺数变化的结

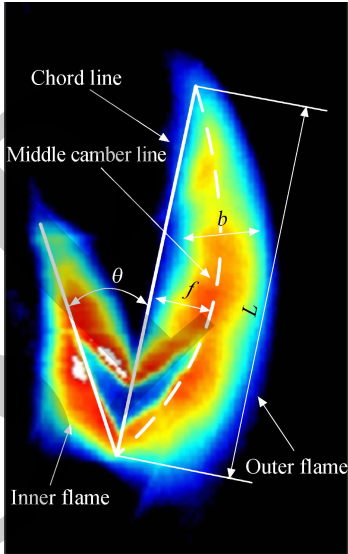


图 6 OH-PLIF 示意图及火焰结构

Fig. 6 OH-PLIF schematic diagram and flame structure

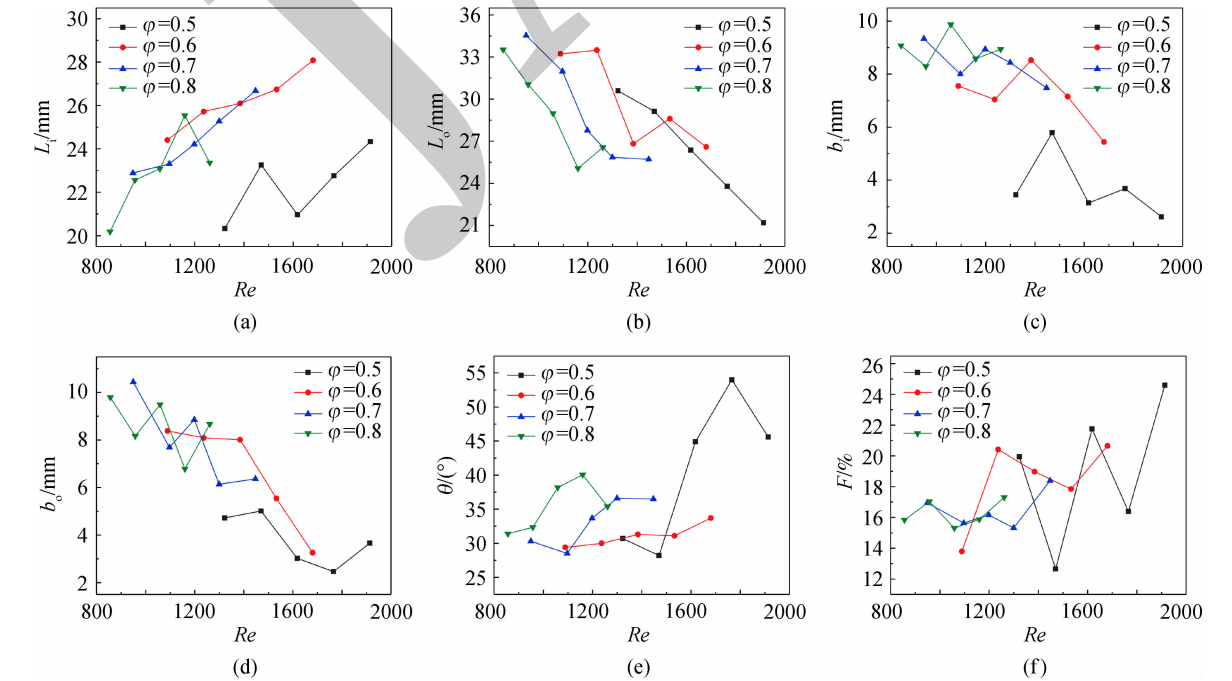


图 7 火焰结构特征参数随雷诺数变化的影响

Fig. 7 Effect of Reynolds number on characteristics of flame structure

果。图中 φ 为当量比, b_i 和 b_o 分别为内、外焰厚度。由图 7(a)可知,内焰的长度随着雷诺数的增加而增加,在合适的当量比条件下,湍流强度会促进内焰在形成稳定结构的条件下向射流的下游延伸。而图 7(b)表明外焰的长度随雷诺数增加而减小。图 7(c)和图 7(d)表示了内外焰的宽度变化,两者变化的规律基本一致,都呈下降趋势,且外焰受湍流强度影响较大。随着雷诺数的增加,火焰变得瘦长,根部宽度逐渐减小,使火焰结构不稳定性增强,但上游喷口对下游喷口气流的补充,增加了内圈燃烧反应区域,稳定了环形流场。实验结果表明,雷诺数升高,降低了单个火焰自身的结构稳定性,但促进各个喷口射流相互影响,并增加燃烧室的环形火焰整体燃烧强度。

图 7(c)和图 7(f)表示了喷口火焰的张角和 外焰的相对弯度随雷诺数变化的规律。当雷诺数增加时,内、外焰之间的张角也随之增大。高速射流对内侧火焰产生了卷吸作用,使得内外焰的燃烧区域相对变窄。同时,外侧的火焰本身其反应区域较长,散热损失比内焰大,所以外焰的燃烧强度进一步减弱。通过平均图像可知,弦长及宽度所反映的单束火焰燃烧区域虽然缩小,但外焰的褶皱区域厚度却弥补了缩小的反应面积。实验结果发现,内焰长度及外焰在相对弯曲程度上的增长不仅受高速射流的卷吸作用和散热损失的影响,

其主要因素为康达效应的作用^[20-21]。当流体有离开本来的流动方向,改为随着凸出的物体表面流动的现象称为康达效应。当射流流过内环壁面时,康达效应诱导其倾斜,使得火焰的锋面结构得到了拉伸。所以内侧火焰宽度变窄,但长度增加。外焰在康达效应和外壁面挤压的共同作用下,其相对弯曲度增加,火焰张角也相对扩大。

图 8 显示火焰特征参数随当量比变化的结果。图 8(a)和图 8(b)分别为内外焰长度的变化趋势,它们均在当量比为 0.6 附近出现了峰值。随着当量比的增加,火焰的燃烧传播速度相对于气流速度先增大后减少,压缩了其火焰锋面,所以内外焰的长度在最佳当量比之后开始降低,外焰的变化趋势相对内焰更大。

图 8(c)中内焰宽度变化随当量比整体增加,其变化趋势在当量比 0.6 之前较大,之后便基本保持不变。图 8(d)的外焰宽度变化规律与其内焰长度变化大致相同,在低当量比下增长迅速,但在当量比 0.6~0.8 范围内,其趋势变化产生了持续的波动。随着当量比的提高,大量的未燃气体扩散到外焰附近,因为外焰本身无法与内焰一样有较高的保温环境,散热损失对火焰宽度增长的趋势产生脉动影响,使得其外焰燃烧不稳定。实验结果表明,环形燃烧器火焰结构在当量比为 0.6 条件下表现较好,流场整体荧光强度较高,燃

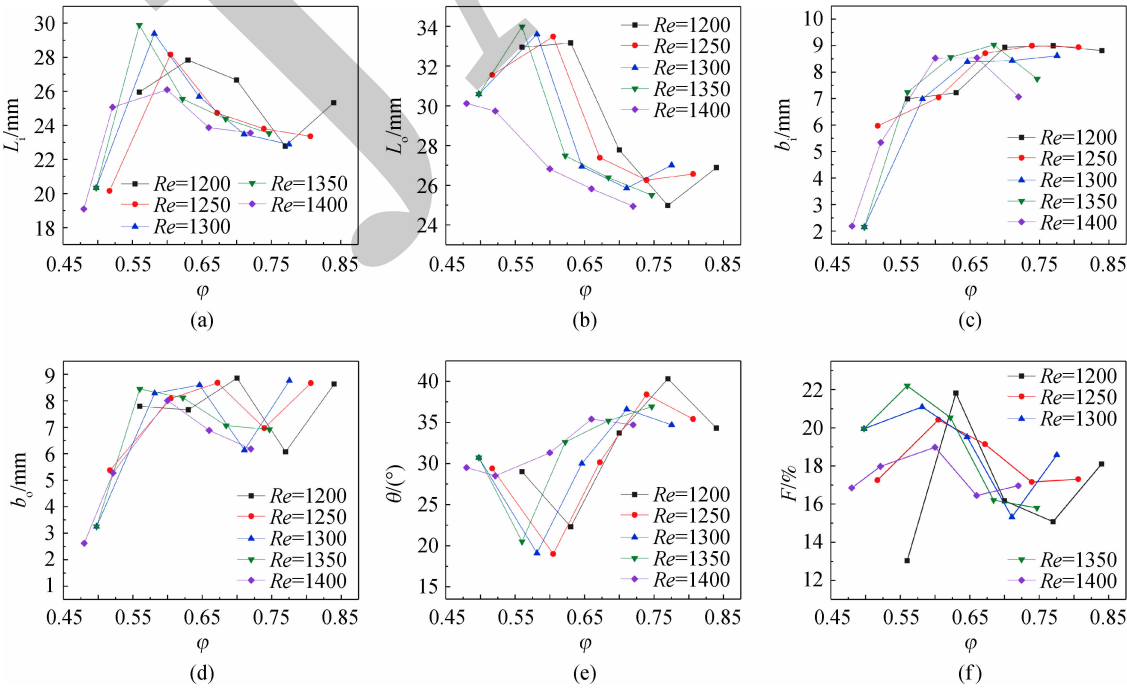


图 8 火焰结构特征参数随当量比变化的影响
Fig. 8 Effect of equivalence ratio on characteristics of flame structure

烧剧烈且预混火焰与环形结构稳定,各喷口火焰之间扰动充分。

图8(e)和图8(f)表示了火焰的张角和外焰的相对弯度随当量比变化的规律。随着当量比的升高,火焰的张角逐渐增大,大量未燃的燃料只有向外层扩散与外界通入的空气接触才能继续燃烧,所以火焰根部区域变宽,从而扩大了内外焰之间的距离。外焰的相对弯度略微降低,这是因为当量比的变化对环形燃烧器中康达效应影响较弱。结果表明,适当的调节环形燃烧室中燃料当量比才能有利于火焰的稳定性,外焰更加靠近内侧燃烧,卷吸更多的未燃气体进入内侧强燃烧区域,有利于环形火焰的稳定性。

3 结 论

本文利用平面激光诱导荧光技术,对环形燃烧室的甲烷预混火焰的OH基分布进行了实验研究,通过观察OH自由基的瞬态和平均图像,获得了当量比与雷诺数对燃烧状态的影响规律,定量分析了火焰结构特征参数的变化趋势,得出以下结论:

1) 甲烷预混火焰在环形燃烧室中为湍流火焰,但保留一定层流火焰结构。OH自由基呈现环形分布,并产生托举与火焰分叉现象。

2) 雷诺数增加使内焰长度增加,外焰减小,其宽度均呈上升趋势,外焰相对弯度增加。康达效应使内焰向内壁面弯曲,火焰张角增大。

3) 适当的调节预混火焰的当量比,有利于火焰结构的稳定。当量比增加,内焰和外焰的长度先升高后下降,内、外焰的宽度均增加,火焰张角先减小后增大,外焰相对弯度变化不明显。

参考文献:

[1] CHOI M, SUNG Y, WON M, et al. Effect of fuel distribution on turbulence and combustion characteristics of a micro gas turbine combustor[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2017, 48(1): 24-35.

[2] SEMPRINI S, SÁNCHEZ D, PASCALE A D. Performance analysis of a micro gas turbine and solar dish integrated system under different solar-only and hybrid operating conditions[J]. *Solar Energy*, 2016, 132(1): 279-293.

[3] BASRAWI F, IBRAHIM T K, HABIBK, et al. Techno-economic performance of biogas-fueled micro gas turbine cogeneration systems in sewage treatment plants; Effect of prime mover generation capacity[J]. *Energy*, 2017, 124(1): 238-248.

[4] 李皓然, 丁天宝, 李玮薇, 等. 某微型燃气轮机适应高原起

动的技术方案[J]. *航空动力学报*, 2018, 33(5): 1050-1056.

LI Haoran, DING Tianbao, LI Weiwei, et al. Starting technical scheme of a micro gas turbine adapting to plateau[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2018, 33(5): 1050-1056. (in Chinese)

[5] 谢法, 张珊珊, 蒋洪德. 入口流动参数脉动对燃气轮机燃烧室燃烧不稳定的影响[J]. *航空动力学报*, 2015, 30(7): 1561-1565.

XIE Fa, ZHANG Shanshan, JIANG Hongde. Effects of inlet flow parameters oscillation on combustion instability of gas turbine combustor[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2015, 30(7): 1561-1565. (in Chinese)

[6] 王文波, 岳明, 杜春雨, 等. 喷嘴损伤对环形回流燃烧室性能的影响[J]. *航空动力学报*, 2017, 32(6): 1335-1341.

WANG Wenbo, YUE Ming, DU Chunyu, et al. Effect of nozzle damage on performance of annular backflow combustor[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2017, 32(6): 1335-1341. (in Chinese)

[7] 段建东, 赵克, 吴凤江, 等. 回热循环微型燃气轮机非线性数学模型[J]. *航空动力学报*, 2014, 29(1): 199-206.

DUAN Jiandong, ZHAO Ke, WU Fengjiang, et al. Nonlinear mathematical model of regenerative cycle micro gas turbine[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2014, 29(1): 199-206. (in Chinese)

[8] SANTIS A D, INGHAM D B, MAL, et al. CFD analysis of exhaust gas recirculation in a micro gas turbine combustor for CO₂ capture[J]. *Fuel*, 2016, 173(1): 146-154.

[9] 严浩, 张少华, 余西龙, 等. OH与CH₂O双组分平面激光诱导荧光对旋流燃烧室火焰结构与脉动特征的研究[J]. *航空动力学报*, 2019, 34(4): 894-907.

YAN Hao, ZHANG Shaohua, YU Xilong, et al. Flame structure and dynamics characters investigation by OH and CH₂O planar laser-induced fluorescence in the swirl combustor[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2019, 34(4): 894-907. (in Chinese)

[10] KUTNE P, MEIER W, BOXX I, et al. 3 kHz PIV/OH-PLIF measurements in a gas turbine combustor at elevated pressure[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, 35(3): 3793-3802.

[11] HÄBER T, GEBRETSADIK M, BOCKHORNH, et al. The effect of total reflection in PLIF imaging of annular thin films[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2015, 76(1): 64-72.

[12] 刘玉英, JEAN-MICHEL M, PHILIPPE B. 基于氢氧基平面激光诱导荧光法的稀释燃烧机理实验研究[J]. *中国电机工程学报*, 2008, 28(32): 61-65.

LIU Yuying, JEAN-MICHEL M, PHILIPPE B. Experimental study on dilution combustion mechanism based on hydroxyl planar laser-induced fluorescence method[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(32): 61-65. (in Chinese)

[13] PU G, HUANG B, ZHANG X, et al. Investigation of flame

structure and burning intensity of partially premixed methane enrichment of syngas using OH-PLIF and kinetic simulation[J]. Combustion Theory and Modelling, 2018, 22 (3):1-14.

[14] LIAO Y H, HERMANSON J C. OH-PLIF Imaging of the reaction zone in swirled, strongly-pulsed jet diffusion flames with a low Reynolds number[J]. Combustion Science & Technology, 2017, 190(4):615-631.

[15] JIN F, TANG C, JIN W U, et al. Study on laminar flame speed and flame structure of syngas with varied compositions using OH-PLIF and spectrograph[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(3):1636-1643.

[16] JIN F, TANG C, WU J, et al. Effect of preferential diffusion and flame stretch on flame structure and laminar burning velocity of syngas Bunsen flame using OH-PLIF [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39 (23):12187-12193.

[17] YANG L, WANG Z H, ZHU Y Q, et al. Premixed jet flame characteristics of syngas using OH planar laser induced fluorescence[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56 (26):2862-2868.

[18] 张文普, 丰镇平. 微型燃气轮机环型燃烧室的设计研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(5):150-153.

ZHANG Wenpu, FENG Zhenping. Design and research of ring combustor for micro gas turbine[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(5):150-153 (in Chinese).

[19] 石黎, 付忠广, 沈亚洲, 等. 值班燃料比对环形燃烧室内 NOx 生成影响的数值研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(22):6156-6163.

SHI Li, FU Zhongguang, SHEN Yazhou, et al. Numerical simulation of pilot fuel percentage on NOx formation in an annular combustion chamber [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(22):6156-6163. (in Chinese)

[20] BARDIA A, SARAF R, MASLOW A, et al. The coanda effect[J]. Anesthesia & Analgesia, 2016, 123 (3): 582-584.

[21] REBA I. Applications of the coanda effect[J]. Scientific American, 1966, 214(6):84-92.

(编辑:李岩梅、张 雪)